

УДК 622.698(01)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ ВУГІЛЛЯ, ВУГІЛЬНО-МАСЛЯНОГО ГРАНУЛЯТУ ТА ВУГІЛЬНО-ГРАНУЛЯТНИХ СУМІШЕЙ

*В.С. Білецький, Донецький національний технічний університет, Україна*

*Ю.Г. Світлий, Науково-виробниче об'єднання «Хаймек», Україна*

*А.П. Воробйов, Донецький національний технічний університет, Україна*

Досліджено процес гідравлічного транспортування вугілля, вуглемасляного грануляту і сумішей «вугілля-гранулят». Показано еволюцію структури твердої фази на дистанції гідротранспортування 0-230 км. Показана принципова можливість і встановлені особливості передачі вуглемасляного грануляту і сумішей «вугілля-гранулят» гідравлічним транспортом як на близькі (сотні метрів, перші кілометри), так і на далекі відстані (перші сотні кілометрів).

**Постановка проблеми.** Проблеми дефіциту енергоресурсів, зокрема природного газу та нафти, які мають як територіальний (регіональний), так і глобальний вимір, актуалізують розробку нових вугільних технологій. У кінці XX – на початку XXI ст. в Донецькому національному технічному університеті розроблено вітчизняний варіант технології масляної грануляції (агломерації) вугілля, аналоги якої відомі в Німеччині, Японії, Індії, США, Канаді, Росії, Італії, Польщі та інших країнах [1-3]. У той же час розпочаті дослідження технологічних властивостей вуглемасляного грануляту як об'єкту зневоднення, гідравлічного транспортування, спалювання, коксування, піролізу, газифікації [1].

**Останні дослідження і публікації з проблеми.** Дослідження гідравлічного транспортування вугілля, вугільно-масляного грануляту та вугільно-гранулятних сумішей виконувалося у [7], А також нами у попередніх роботах [1, 4-6]. Ця стаття є продовженням вказаної серії робіт.

**Мета роботи** – дослідження впливу концентрації і складу водо-вугільних, вугільно-масляного грануляту та вугільно-гранулятних сумішей на енергетичні характеристики гідротранспортування, зокрема втрати напору по трубопроводу, в залежності від швидкості руху гідросуміші.

### Виклад основного матеріалу.

**Експериментальні стенди.** Дослідження процесу гідравлічного транспортування вугільної сировини виконані нами на лабораторній базі та із залученням методик НВО «Хаймек». Процес гідротранспорту досліджено на стенді зі скляних труб діаметром 104 мм. Протяжність скляного трубопроводу становила 52 м. Режим роботи – замкнутий. Установка обладнана відцентровим насосом з двигуном постійного струму потужністю 6 кВт. Вимірювання витрати (швидкості) здійснювалось витратоміром Вентурі, тарованим об'ємно-ваговим способом. Вимірювання питомих витрат напору при русі води і гідросуміші здійснювалось на прямолінійних горизонтальних ділянках довжиною 14,5 м. У якості датчиків використовувались диференціальні мембранні манометри типу ДМ, у якості вторинних пристроїв – диференціально трансформаторні автоматичні пристрої типу ДСП і КСД2.

**Об'єктом досліджень** слугувало вугілля, вуглемазутні гранули з вмістом масла зв'язуючого в межах 15-23 мас.%, а також суміш "вугілля – гранулят", характеристика яких подана в таблиці 1.

**Результати досліджень** подані на рис. 1-6, на яких послідовно за кілометражем дистанції гідротранспортування  $L$  від 0,5 км до 230 км показано еволюцію експериментальних кривих  $i(V)$  втрат напору  $i$  по трубопроводу, в залежності від швидкості руху  $V$  гідросуміші, а також деякі ключові моменти структурних перебудов твердої гранулятної фази та особливості рідкої фази.

**Початкова ділянка гідравлічного транспортування.** Експериментальні криві  $i(V)$  зняті безпосередньо після завантаження вугілля і вуглемасляного грануляту (на дистанції  $L=0,5-2$  км) показані на рис. 1.

Таблиця 1. – Характеристика вугілля і вуглемасляних агрегатів

Досліджуваний матеріал	Гранулоутворююче вугілля			Вміст мазуту в гранулах, $Q_M, \%$	Крупність гранул, $d_a, \text{мм}$
	Марка	Зольність $A^d, \%$	Крупність, мм		
Вугілля	Г	8,5	0 - 1,0 кл. - 0,1 мм 39,7%	-	-
Гранули	Г	8,5	0 - 1,0 кл. - 0,1 мм 39,7%	15	0,5 - 1,6
Гранули	Г	8,5	0 - 0,1	23	1,0 - 2,0
Суміш "вугілля – гранулят"	Г	8,5	0 - 1,0 кл. - 0,1 мм 39,7%	15	0,5 - 1,6

Що стосується вугільної гідросуміші, то криві 3, 4 для гідросуміші з концентрацією відповідно  $c = 50\%$ ,  $18\%$  мають закономірний характер – втрати напору  $i(V)$  у всьому діапазоні швидкостей  $V$  практично паралельні кривій  $i(V)$  для води і закономірно збільшуються зі збільшенням  $c$ . Нетривіальний результат отримано для водо-гранулятної суміші – тут було зафіксовано раніше не спостережуваний і неочікуваний ефект зниження втрат напору водо-гранулятної суміші  $i(V)$  по мірі збільшення швидкості  $V$  (криві 2, 5 для грануляту  $c = 5\%$ ,  $10\%$ ). Більше того, – при  $V > 1,9\text{--}2,0$  м/с втрати напору  $i$  для гранулятної гідросуміші стають меншими, ніж для води. На перший погляд, це парадоксальний результат, який потребував окремого додаткового дослідження. Після декількох дублів експерименту і підтвердження стійкої повторюваності кривих 2, 5 для грануляту  $c = 5\%$ ,  $10\%$  була взята проба гранул і рідкої (несучої) фази. Аншліфи гранул (рис. 2 а) показали наявність на їх поверхні плівки реагенту-зв'язуючого, а мікроскопічні дослідження рідкої фази – те, що вона по суті являє собою грубодисперсну емульсію типу «масло у воді» (рис. 2 б). Причому наявність масляних крапель у рідкій фазі-емульсії тим більша, чим більша швидкість гідравлічного транспортування  $V$ .

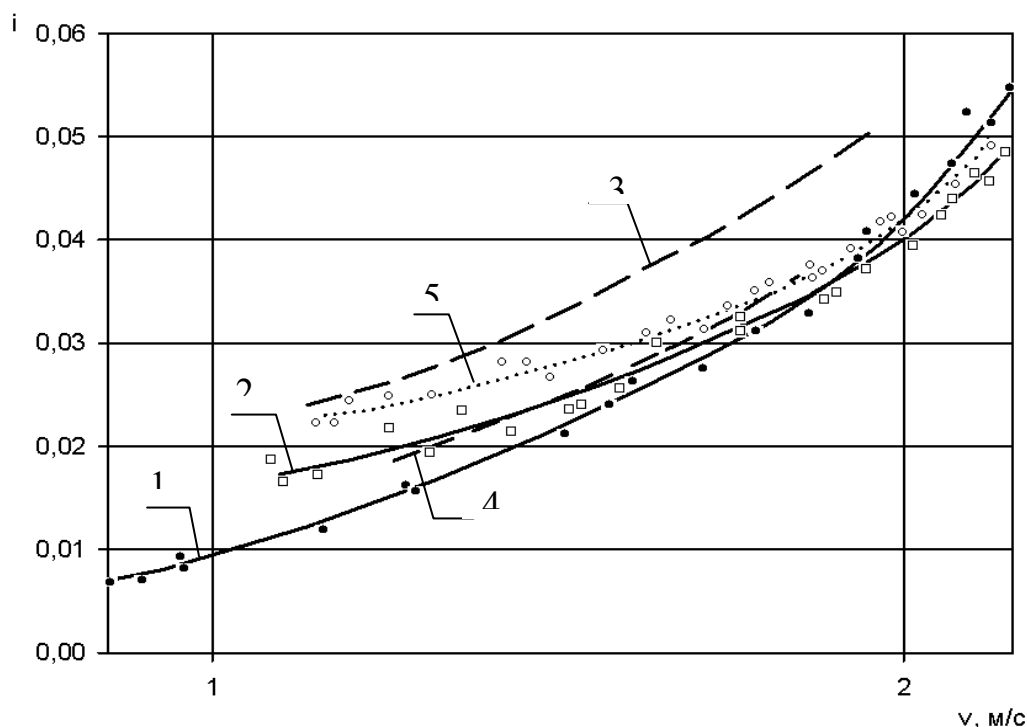


Рис. 1 – Експериментальні криві  $i(u)$  при гідротранспорті вуглемасляного грануляту зняті безпосередньо після його завантаження (на дистанції  $L=0,5\text{--}2$  км):  
1 – вода; 2, 5 – гранулят  $c = 5\%$ ,  $10\%$ ; 3, 4 – вугілля "Г",  $c = 50\%$ ,  $18\%$ .

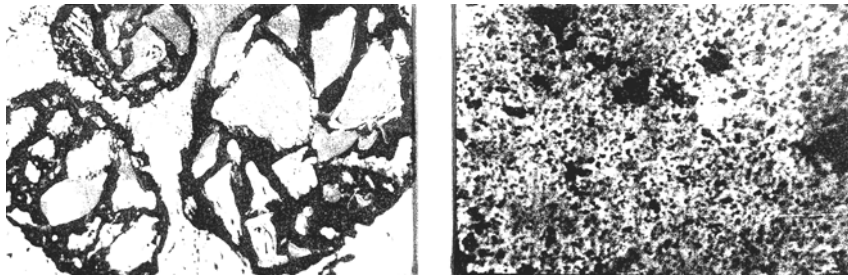


Рис. 2 – Мікроскопія твердої і рідкої фази гідросуміші: а – аншлифи вихідних гранул,  $d = 1,0-2,2$  мм; б – грубодисперсна емульсія типу «масло у воді»

Таким чином, можна припустити, що зафіксоване явище часткового відриву масляної плівки з поверхні вугле-масляних гранул при їх гідротранспортуванні і диспергування відірваних плівок масла під час транспортування суміші у турбулентному режимі з утворенням емульсії «масло у воді» і є відповідальним за нетривіальний характер кривих  $i(V)$  для водо-грануляційної гідросуміші. Тертя шарів емульсії виявляється меншим за тертя шарів води, чим і пояснюється зменшення втрат напору для водо-грануляційної суміші і навіть перетин кривими 2, 5 для грануляту  $c = 5\%$ ,  $10\%$  кривої  $i(V)$  для води.

**Ділянка 4, 20 км гідравлічного транспортування.** Експериментальні криві  $i(V)$  зняті на ділянці 4 і 20 км після завантаження вугілля, вуглемасляного грануляту та сумішей вугілля-гранулят показані на рис. 3 і 4.

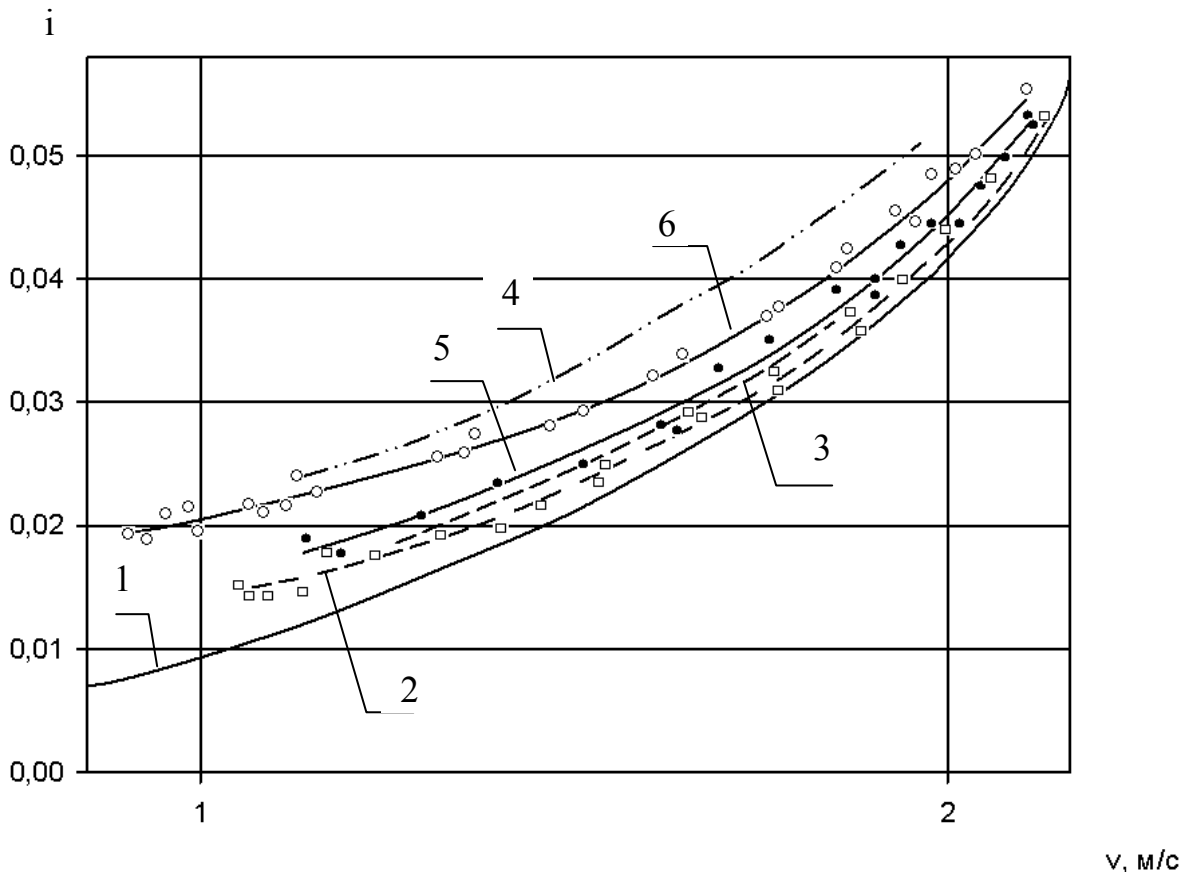


Рис. 3 – Експериментальні криві  $i(u)$  при гідротранспорті вуглемасляного грануляту, зняті після проходження гідросуміші 4 км і 20 км;

1 – вода; 2 – гранулят  $c=5\%$ , 4 км з моменту завантаження; 3 – вугілля "Г",  $c=18\%$ ; 4 – вугілля "Г",  $c=50\%$ ; 5 – гранулят,  $c=10\%$ , 4 км з моменту завантаження; 6 – гранулят  $c=10\%$ , 20 км з моменту завантаження.

Для вугільної гідросуміші на ділянці 4 км після завантаження криві втрати напору  $i(V)$  у всьому діапазоні швидкостей  $V$  практично паралельні кривій  $i(V)$  для води, а втрати напору

закономірно збільшуються зі збільшенням  $c$  (криві 3 і 4,  $c=18\%$ ;  $50\%$ ). Для суміші «вугілля – вугле-масляний гранулят» картина дещо інша. Для гідросуміші гранул зі збільшенням її швидкості руху спостерігається тенденція наближення кривих  $i(V)$  до кривої  $i(V)$  для води для води, але не так активно, як це ми спостерігаємо безпосередньо після завантаження. Це пояснюється нестійкістю емульсії «масло у воді» і конгломерацією вугле-масляних гранул при їх гідротранспортуванні.

Для вугільної гідросуміші на ділянці 20 км після завантаження характер кривих втрати напору  $i(V)$  у всьому діапазоні швидкостей  $V$  не змінюється – вони залишаються практично паралельними кривій  $i(V)$  для води, втрати напору закономірно збільшуються зі збільшенням  $c$  (криві 4 і 5,  $c=18\%$ ;  $50\%$ ).

Щодо грануляційно-вугільних сумішей на ділянці 20 км після завантаження характер кривих втрати напору  $i(V)$  інший. Для гідросумішей, в твердій фазі яких переважає гранулят над вугіллями характер кривих  $i(V)$  близький до кривих для чисто водо-гранульних сумішей (крива 2). Більше того, конгломерація гранул у суміші «вугілля-гранулят» відбувається дуже повільно (при 20 км вона практично відсутня), рідка фаза представлена грубодисперсною емульсією «масло у воді» (так само як і для чисто водо-гранулятих сумішей безпосередньо після їх завантаження) і тому навіть на ділянці у 20 км дистанції гідротранспортування втрати напору для суміші «вугілля : гранулят = 1:2»,  $c=15\%$  у точці  $V = 2,2$  м/с практично дорівнюють втратам напору для води. Якщо ж переважає вугілля – характер кривих  $i(V)$  близький до кривих для чисто водо-вугільних сумішей (крива 3). У чисто гранулятих гідросумішах відбувається розпад утвореної на перших кілометрах транспортування емульсії «масло у воді», конгломерація гранул, і в результаті цих явищ – виположування кривої  $i(V)$ , яка близько не підходить до кривої  $i(V)$  для води у всьому діапазоні робочих швидкостей, хоча й дещо наближається до неї зі збільшенням швидкості руху гідросуміші (див. криву 6).

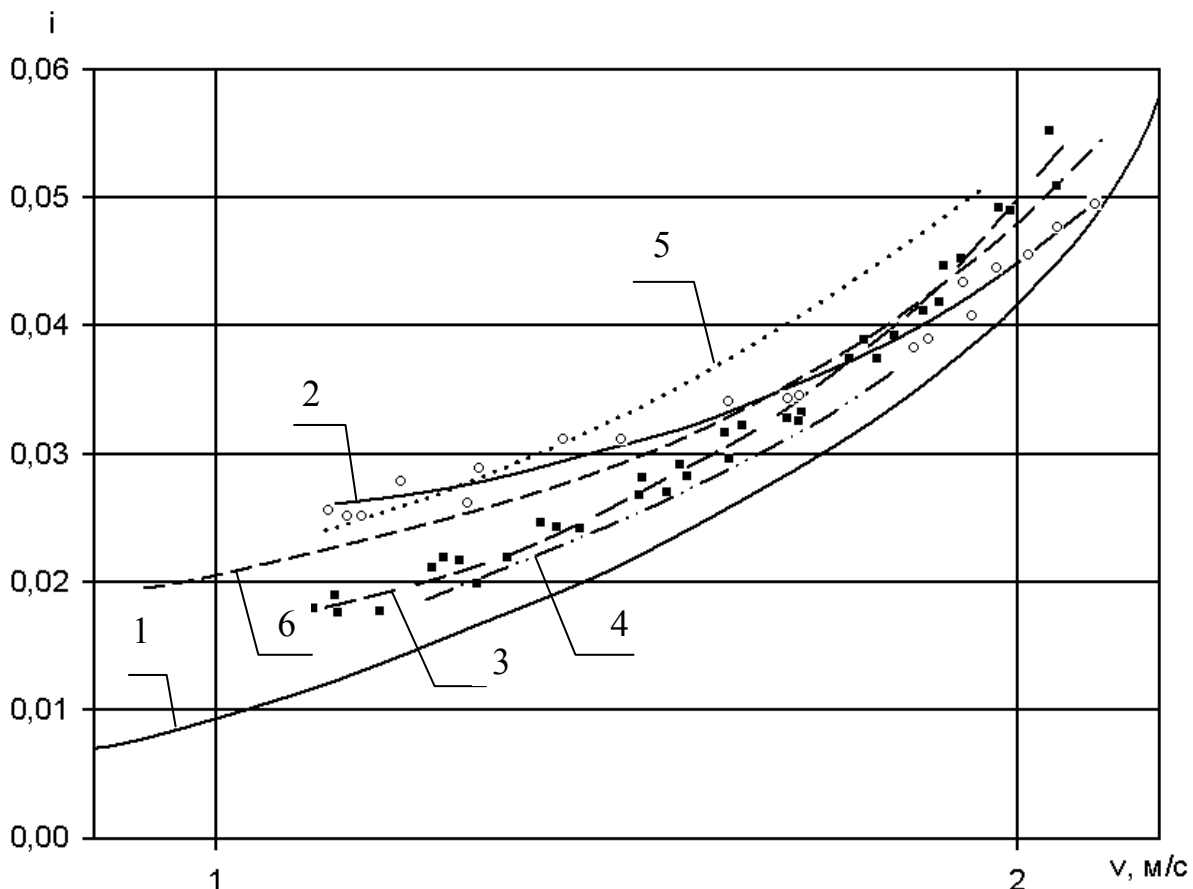


Рис. 4 – Експериментальні криві  $i(u)$  при гідротранспорті вугілля, вуглемасляного грануляту і суміші вугілля-гранулят;  
 1 – вода; 2 – суміш вугілля : гранулят = 1:2;  $c=15\%$ ; 3 – суміш вугілля : гранулят=2:1;  $c=30\%$ ;  
 4, 5 – вугілля "Г",  $c=18\%$ ;  $c=50\%$ ; 6 – гранулят  $c=10\%$ , 20 км з моменту завантаження.

**Ділянка 30, 230 км гідралічного транспортування.** Експериментальні криві  $i(V)$  зняті на ділянці 30, 230 км після завантаження вугілля, вуглемасляного грануляту та сумішей вугілля-гранулят показані на рис. 5.

Для вугільної гідросуміші на ділянці 230 км після завантаження характер кривих втрати напору  $i(V)$  у всьому діапазоні швидкостей  $V$  не змінюється – вони залишаються практично паралельними кривій  $i(V)$  для води, втрати напору закономірно збільшуються зі збільшенням  $c$  (криві 5 і 6,  $c=18\%$ ;  $50\%$ ). Зауважимо, що крива  $i(V)$  для водо-вугільної суміші  $c=50\%$  приблизно однакова на дистанції 20, 30 і 230 км, що свідчить про невеликі зміни у гранулометричному складі твердої фази і практичній відсутності розмокання досліджуваного вугілля.

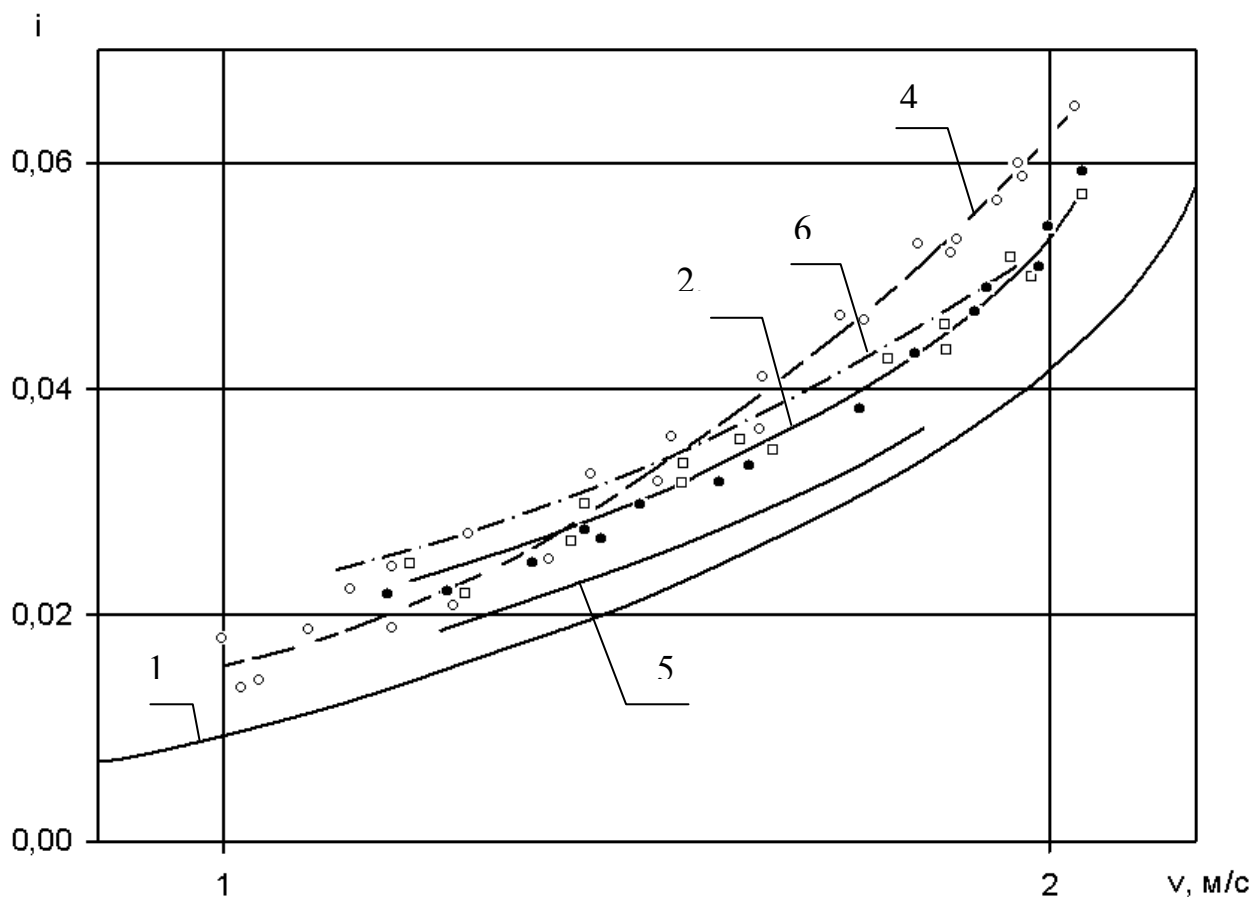


Рис. 5 – Експериментальні криві  $i(u)$  при гідротранспорті вугілля, вуглемасляного грануляту і суміші вугілля-гранулят:

1 – вода; 2 – суміш вугілля-гранулят (34% гранул),  $c=50\%$  після 30 км гідротранспортування; 3 – те ж саме, але після добавки в гідросуміш гасу з розрахунку 1 кг/т сухого вугілля; 4 – після гідротранспортування отриманої суміші вугілля-гранулят на 230 км; 5, 6 – вугілля "Г",  $c=18\%$ ;  $c=50\%$ .

Характер поведінки гідросуміші вугілля-гранулят (34% гранул),  $c=50\%$  після 30 км гідротранспортування такий самий, як і після 20 км. Спроба модифікувати поверхню вугілля і гранул добавкою в гідросуміш гасу з розрахунку 1 кг/т сухого вугілля практично не змінює характер кривої  $i(V)$ .

Більш суттєві зміни відбуваються у структурі гідросуміші вугілля-гранулят (34% гранул),  $c=50\%$  після 230 км гідротранспортування. На такій відстані вуглемасляні гранули, що транспортуються у суміші з вугіллям, дезінтегрують, первинно неагломероване вугілля обмаслюється і утворюються нові вуглемасляні структури – з більш тонкими масляними плівками, які надалі конгломерують (рис. 6).

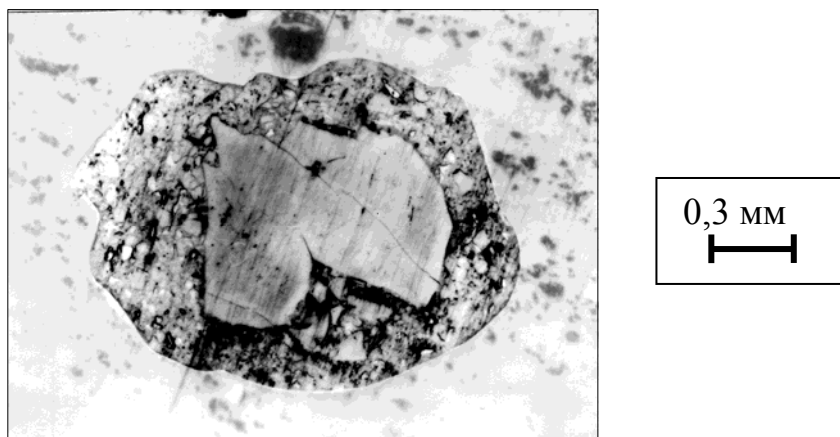


Рис.6 Структура вуглемасяних конгломератів з вугілля 0 – 1 мм після гідравлічного транспортування суміші «вугілля-гранулят» на відстань понад 200 км.

Такими структурними змінами і пояснюється збільшення втрат напору в робочому діапазоні швидкостей.

### Висновки

1. Вуглемасяний гранулят при гідротранспортуванні проходить декілька стадій структурних змін, які впливають на характер кривої  $i(V)$ . Врешті решт виникають конгломерати, які за крупністю в 2-3 рази перевищують крупність первинних гранул, що обумовлює різке збільшення гідравлічних втрат напору в трубопроводі.

2. Встановлені особливості поведінки вуглемасяного грануляту і сумішей «вугілля – гранулят» як об'єктів гідравлічного транспортування. Показана принципова можливість передачі їх гідравлічним транспортом як на близькі (сотні метрів, перші кілометри), так і на далекі відстані (перші сотні кілометрів).

### Список літератури

1. Білецький В. С. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля / В. С. Білецький, П. В. Сергєєв, Ю. Л. Папушин. – Донецьк : Грань, 1996. – 264 с.
2. Vnal, I.; GorgVn Ersan, M. Factors affecting the oil agglomeration of Sivas-Divrigi VIVcayir lignite //Energy SoVrces, 2007. Part A: Recovery, Vtilization, and Environmental Effects; JoVrnal VolVme: 29; JoVrnal IssVe: 11. page(s) 893-993.
3. Харада Т., Мацуо Т. Агломерація у рідинах// Ніхон Когьо Кайсі. - 1982. - № 1134, С. 714-722.
4. Исследования гидротранспортирования угля с углемасяными гранулами / Ю. Ф. Власов, Ю. Г. Свитлый, Т. В. Карлина, П. Д. Креймер, В. С. Белецкий // Пром. транспорт. – 1983. – № 12. – С. 12.
5. Белецкий В.С. Гидротранспорт угля с масляной грануляцией // Пром. транспорт. – М., 1984. – № 6. – С. 17.
6. Світлий Ю.Г. Гідравлічний транспорт / Ю. Г. Світлий, В. С. Білецький ; Донец. від-ня Наук. т-ва ім. Шевченка. – Донецьк : Сх. вид. дім, 2009. – 436с.
7. Rigbi G.R., Jones C.V., Meiwarning D.E. SlVrry pipeline StVdeson the BHP-BPA 30-tonne per hoVr demonstration plant//5-th. Int. Conf. on the HydraVlic Transport of Solids in Pipes. JohannesbVrg, AVgVst 25-27. - 1982. - p. D1.